HAL
open science

Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions

Nicolas Cornille, Dorian Garcia, M.A. Sutton, S.R. Mcneill, Jean-José Orteu

To cite this version:

Nicolas Cornille, Dorian Garcia, M.A. Sutton, S.R. Mcneill, Jean-José Orteu. Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions. Instrumentation, Mesure, Métrologie, 2005, 4 (3-4), p.105-124. hal-01832918

HAL Id: hal-01832918

https://hal.science/hal-01832918v1

Submitted on 6 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Calibrage d'imageurs avec prise en compte des distorsions

Nicolas Cornille[*,] — Dorian Garcia[**,***] — Michael A. Sutton[**] Stephen R. McNeill[**] — Jean-José Orteu[*]**

[*] *École des Mines d'Albi-Carmaux, Campus Jarlard, F-81013 Albi, France*
{cornille,Jean-Jose.Orteu}@enstimac.fr

[**] *University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA*
{sutton,mcneill}@engr.sc.edu

[***] *Correlated Solutions, Inc., P.O. Box 4840, West Columbia, SC 29171, USA*
dorian@CorrelatedSolutions.com

RÉSUMÉ. *Le calibrage d'un imageur est une étape importante pour la métrologie dimensionnelle par vision artificielle. Pour obtenir des mesures dimensionnelles précises, il est indispensable de prendre en compte les distorsions géométriques induites par le système optique utilisé. L'approche classique consiste à modéliser les distorsions par un modèle paramétrique. Nous montrons qu'une approche non paramétrique est mieux adaptée au cas de systèmes optiques complexes. Les méthodes classiques de calibrage utilisent une mire constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...). Nous montrons que l'utilisation d'une mire de mouchetis (motif aléatoire) couplée à la corrélation d'images permet à la fois d'obtenir une meilleure précision de calibrage et simplifie sa mise en œuvre pratique. Les nouvelles approches proposées sont illustrées à travers trois applications : le calibrage d'une caméra CCD, le calibrage d'un stéréo-microscope, et le calibrage d'un microscope électronique à balayage.*

ABSTRACT. *Camera calibration is an important prerequisite in computer vision for performing accurate measurements. In that regard, the distortions induced by the optical system must be considered. The classic approach models these distortions using a parametric function. In this paper we show that for complex systems a non-parametric model outperforms the previous techniques. Furthermore, the proposed method makes use of a calibration target with a random (speckle like) pattern and applies the technique of digital image correlation for registering the target images. Compared to the classic approaches which rely on a well-defined geometrical pattern (e.g., chess-board, crossing lines, circles), the proposed method not only improves significantly the calibration accuracy, but also provides greater flexibility by eliminating the need for a special calibration target. These improvements are especially prominent for microscopy applications and demonstrated through three experimental investigations.*

MOTS-CLÉS : *calibrage de caméra, imageur, distorsions, corrélation d'images, stéréo-microscope, microscope électronique à balayage.*

KEYWORDS: *camera calibration, imaging system, distortions, digital image correlation, stereo-microscope, scanning electron microscope.*

1. Introduction

Le calibrage géométrique d'un imageur[1] consiste à déterminer la relation mathématique existant entre les coordonnées des points 3D de la scène observée et les coordonnées 2D de leur projection dans l'image (points-image) (*cf.* figure 1). Cette étape de calibrage constitue le point initial pour plusieurs applications de la vision artificielle, comme par exemple la reconnaissance et la localisation d'objets, le contrôle dimensionnel de pièces, la reconstruction de l'environnement pour la navigation d'un robot mobile, etc.

Figure 1. *Calibrer un imageur consiste à estimer sa fonction de transfert*

Le calibrage d'un imageur est particulièrement important lorsque l'on doit obtenir, à partir des images acquises, des informations métriques en vue d'applications de mesures dimensionnelles. Pour obtenir des mesures dimensionnelles précises, il est indispensable de prendre en compte les distorsions géométriques induites par le système optique utilisé.

L'approche classique consiste à modéliser les distorsions en enrichissant le modèle sténopé classique (Faugeras, 1993; Horaud *et al.*, 1995) (modèle de projection perspective simple, dit modèle « pinhole » en anglais) par des termes supplémentaires (Brown, 1971; Beyer, 1992; Heikkila *et al.*, 1997). Le modèle est alors paramétrique[2] et il permet de prendre en compte les distorsions classiques de type radiale, prismatique, de décentrage (Weng *et al.*, 1992; Zeller, 1996; Garcia *et al.*, 2001; Garcia, 2001). Par contre, ce type de modèle s'avère inadapté pour la prise en compte de distorsions plus complexes. En particulier, le modèle paramétrique ne permet pas de modéliser correctement les systèmes optiques complexes tels qu'un stéréomicroscope (Schreier *et al.*, 2004) ou un microscope électronique à balayage (Cornille *et al.*, 2003; Cornille, 2005) (*cf.* section 4).

Pour pouvoir prendre en compte n'importe quel type de distorsion, même complexe, il est préférable d'adopter une approche non-paramétrique (type « boîte noire »). Certains auteurs (Brand *et al.*, 1994; Peuchot, 1994) ont proposé une approche non paramétrique basée sur la comparaison entre l'image d'une grille de calibrage et l'image d'une grille de référence pré-enregistrée. Le champ de distorsions de l'imageur est obtenu par interpolation des distorsions calculées aux nœuds de la grille. La précision des résultats dépend à la fois de la qualité de la grille calibrée, de la qualité de la détection sub-pixel des nœuds de la grille, et de la qualité du dispositif expérimental

1. Nous désignons par imageur l'ensemble constitué par le capteur et le système optique associé.
2. Dans la suite de cet article, nous désignons par « modèle paramétrique » le modèle sténopé simple ou le modèle sténopé enrichi explicitement par ces termes supplémentaires.

permettant de translater la grille calibrée parallèlement à elle-même. L'approche que nous proposons utilise également un modèle non-paramétrique de distorsion mais elle est basée sur des fonctions splines pour représenter la fonction de distorsion qui traduit au mieux la façon dont l'image idéale est distordue (*cf.* section 2.2.2).

En général, le modèle d'imageur est estimé à partir de l'analyse d'une séquence d'images d'une mire (dite de calibrage) constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...). La qualité du calibrage dépend alors de la qualité d'extraction des points de calibrage (coins des damiers, nœuds de la grille, centres des ellipses, etc.). Nous proposons d'utiliser plutôt une mire de mouchetis (motif aléatoire) déplacée librement devant le champ de vue de l'imageur à calibrer. Le modèle de caméra est obtenu par analyse de la séquence d'images de mouchetis. Dans ce cas, il n'y a pas à proprement parler d'extraction de points de calibrage : une grille virtuelle est déposée dans la première image de la séquence et la position de la grille dans les images suivantes est obtenue par corrélation d'images. L'utilisation de la corrélation d'images présente de nombreux avantages qui sont détaillés dans la section 3.2 (précision de mise en correspondance des images, nombre de points de calibrage plus élevé, possibilité de calibrer en utilisant la texture naturelle des objets de la scène, etc.).

La procédure proposée est facile à mettre en œuvre tout en fournissant un calibrage précis.

2. Modélisation de l'imageur

Dans cette section, nous décrivons d'abord le modèle sténopé classique puis les différents modèles permettant de prendre en compte les distorsions : approches paramétrique et non-paramétrique.

2.1. *Le modèle de projection*

Le modèle sténopé (Faugeras, 1993; Horaud *et al.*, 1995) modélise un imageur par une projection perspective. Ce modèle transforme un point 3D de l'espace M en un point-image m (notés respectivement $\tilde{\mathsf{M}}$ et $\tilde{\mathsf{m}}$ lorsqu'ils sont exprimés en coordonnées homogènes) et peut se décomposer en trois transformations élémentaires successives (*cf.* figure 2) :

1) une transformation rigide $\mathbf{T}$ (matrice 4×4), reliant[3] le repère du monde $\mathcal{R}^{\mathsf{w}}$ (choisi arbitrairement) au repère imageur $\mathcal{R}^{\mathsf{c}}$:

$$\underline{\tilde{\mathsf{M}}} \cong \mathbf{T}\tilde{\mathsf{M}} \qquad [1]$$

3. Le symbole $\cong$ désigne l'égalité projective, *i.e.* l'égalité définie à un facteur non nul près : $\tilde{\mathsf{m}} \cong s\,\tilde{\mathsf{m}}, \forall s \in \mathbb{R}^{\star}$.
Les majuscules soulignées (comme dans $\underline{\tilde{\mathsf{M}}}$) signifient que les coordonnées du point 3D M sont exprimées dans le repère imageur $\mathcal{R}^{\mathsf{c}}$ et les minuscules soulignées (comme dans $\underline{\tilde{\mathsf{m}}}$) signifient que les coordonnées du point 2D m sont exprimées dans le repère capteur $\mathcal{R}^{\mathsf{s}}$.

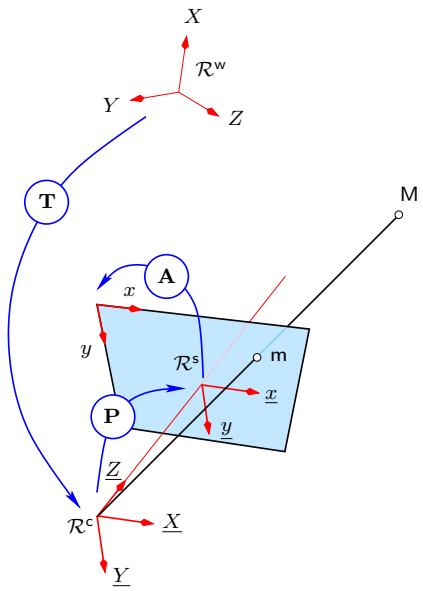

Figure 2. *Les trois transformations élémentaires du modèle sténopé, et les repères associés*

2) une projection perspective $\mathbf{P}$ (matrice 3×4), reliant le repère imageur $\mathcal{R}^{\mathsf{c}}$ au repère capteur $\mathcal{R}^{\mathsf{s}}$ (plan rétinien) :

$$\tilde{\underline{\mathsf{m}}} \cong \mathbf{P}\tilde{\underline{\mathsf{M}}} \qquad [2]$$

3) une transformation affine $\mathbf{A}$ (matrice 3×3), reliant le repère capteur $\mathcal{R}^{\mathsf{s}}$ au repère image (tableau de pixels) :

$$\tilde{\mathsf{m}} \cong \mathbf{A}\tilde{\underline{\mathsf{m}}} \qquad [3]$$

La composition des trois transformations (1), (2) et (3) conduit à l'équation du modèle sténopé :

$$\tilde{\mathsf{m}} \cong \mathbf{APT}\tilde{\mathsf{M}} \qquad [4]$$

La transformation $\mathbf{AP}$ est définie par 5 paramètres appelés *paramètres intrinsèques* et la transformation $\mathbf{T}$ est définie par 6 paramètres (3 pour la rotation et 3 pour la translation) appelés *paramètres extrinsèques*.

2.2. *Prise en compte des distorsions*

Le modèle sténopé [4] modélise un imageur idéal (simple projection perspective) et ne prend pas en compte les éventuelles distorsions géométriques induites par le système optique utilisé. Plusieurs auteurs (Brown, 1971; Beyer, 1992) ont montré que pour des applications de métrologie dimensionnelle, il était indispensable de prendre en compte ces distorsions afin de pouvoir les corriger.

Partant du modèle sténopé, les effets des distorsions peuvent être modélisés par une quatrième transformation, reliant les coordonnées-image « idéales » [4] (non accessibles directement) aux coordonnées-image « réelles » (fournies par l'imageur) :

$$\breve{\mathsf{m}} = \mathcal{D}(\mathsf{m}) \qquad [5]$$

où $\mathcal{D}$ est la fonction de distorsion, reliant les points-image idéaux m aux points-image réels distordus $\breve{\mathsf{m}}$.

Le modèle d'imageur avec distorsion est illustré sur la figure 3.

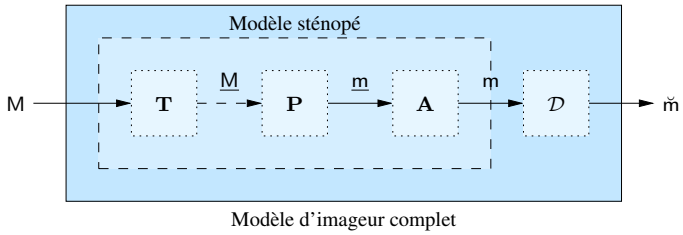

Figure 3. *Modèle d'imageur avec distorsion*

2.2.1. *Approche paramétrique*

Une première approche, relativement classique, consiste à modéliser la distorsion en enrichissant le modèle sténopé par des termes supplémentaires (le modèle devient alors non linéaire). Dans cette approche, le modèle s'inspire de la théorie des aberrations géométriques des systèmes centrés en rajoutant des termes correctifs correspondants à différents types de distorsions : distorsion radiale, prismatique, de décentrage (Weng *et al.*, 1992; Zeller, 1996; Garcia, 2001).

Il est à noter que, dans cette approche, les auteurs appliquent les termes correcteurs aux coordonnées $\underline{\mathsf{m}}$ exprimées dans le repère capteur (plan rétinien) plutôt qu'aux coordonnées discrétisées m. Basé sur une approche physique du mode de distorsion, ce modèle distord les points après projection sur le plan rétinien avant d'appliquer la transformation $\mathbf{A}$ qui produit l'image discrétisée (tableau de pixels).

4. Qui seraient fournies par un imageur idéal exempt de distorsion obéissant au modèle sténopé.

Par rapport au schéma de la figure 3, cela signifie que la fonction de distorsion $\mathcal{D}$ se situe entre la transformation $\mathbf{P}$ et la transformation $\mathbf{A}$.

2.2.2. *Approche non-paramétrique*

Dans le cas de systèmes optiques complexes, nous avons montré (*cf.* section 4) qu'il est préférable de modéliser la distorsion de façon non-paramétrique en utilisant des fonctions splines (Nielsen, 1998). Dans ce cas, il s'agit d'une modélisation purement mathématique (approche type « boîte noire ») visant à déterminer la fonction de distorsion qui traduit au mieux la façon dont l'image idéale est distordue (Brand *et al.*, 1994; Peuchot, 1994). S'agissant d'une modélisation purement mathématique, il n'est pas gênant d'adopter dans ce cas le schéma de la figure 3, et de rechercher la fonction de distorsion $\mathcal{D}$ reliant les coordonnées-image idéales (x, y) du point m aux coordonnées-image réelles $(\breve{x}, \breve{y})$ du point $\breve{\mathsf{m}}$.

Dans cette approche, pour pouvoir corriger facilement la distorsion, il est préférable d'adopter le modèle schématisé sur la figure 4, dans lequel on utilise la fonction réciproque $\mathcal{C}$ de correction de distorsion au lieu de la fonction de distorsion $\mathcal{D}$. En effet, utiliser $\mathcal{C}$ présente l'avantage de permettre de corriger directement la distorsion alors qu'inverser la fonction $\mathcal{D}$ peut être très coûteux en temps de calcul, notamment lorsque sa fonction réciproque $\mathcal{C}$ ne peut pas être déterminée analytiquement. De plus, le domaine de définition de la fonction spline de correction $\mathcal{C}$ est connu a priori et déterminé par la dimension des images, alors que la fonction spline de distorsion $\mathcal{D}$ a un domaine de définition non connu a priori puisque exprimé dans le plan rétinien lui-même défini par calibrage.

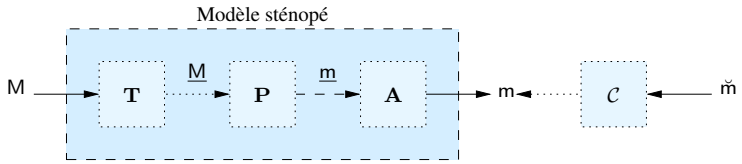

Figure 4. *Modèle d'imageur avec correction de la distorsion*

L'équation de correction de distorsion devient :

$$\mathsf{m} = \mathcal{D}^{-1}(\breve{\mathsf{m}}) = \mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}) \qquad [6]$$

L'estimation de la fonction de correction de distorsion $\mathcal{C}$ consiste à approximer les composantes horizontales (suivant l'axe x) et verticales (suivant l'axe y) du champ de correction de distorsion par deux surfaces splines $\mathcal{S}_x$ et $\mathcal{S}_y$. $\mathcal{S}_x$ approxime la surface définie par les points $(\breve{x}_i, \breve{y}_i, x_i)$ et $\mathcal{S}_y$ approxime la surface définie par les points $(\breve{x}_i, \breve{y}_i, y_i)$. Une fonction spline est en fait composée de $m \times n$ surfaces continûment jointives (*cf.* figure 5). L'approximation est réalisée en divisant le domaine de définition du champ de correction de distorsion en $m \times n$ rectangles (appelés « patches »).

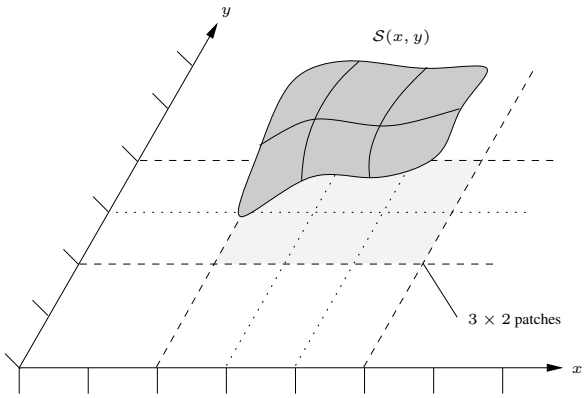

Figure 5. *La surface spline d'approximation est composée de plusieurs surfaces continûment jointives définies chacune sur un patch* (3×2 *patches dans l'exemple)*

3. Procédure de calibrage

Calibrer le système représenté sur la figure 4 consiste à estimer les éléments $\mathbf{T}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{A}$ et $\mathcal{C}$ qui relient les coordonnées des points 3D M de la scène observée et les coordonnées 2D de leurs points-image $\breve{\mathsf{m}}$.

En pratique, le calibrage est réalisé en utilisant une ou plusieurs images d'un objet étalon qui fournit les points 3D M (dits points 3D de calibrage). Les coordonnées 2D de leurs points-image $\breve{\mathsf{m}}$ sont déterminées par analyse d'image.

Les premières méthodes de calibrage proposées utilisaient un objet de calibrage 3D (mire de calibrage «volumique») qui avait le plus souvent la forme d'un dièdre ou d'un trièdre (Brown, 1971; Tsai, 1986; Faugeras *et al.*, 1987). Ce type d'objet permet de calibrer la caméra à partir d'une seule image mais en revanche sa précision de construction (dont dépend la précision du calibrage) est difficile à garantir et à maintenir et sa manipulation n'est pas aisée. C'est la raison pour laquelle d'autres méthodes sont apparues, basées sur le déplacement précis (avec l'aide d'une table de translation micrométrique) d'une mire plane (plus facile à réaliser précisément qu'un objet étalon 3D) (Faugeras *et al.*, 1987; Tsai, 1987; Weng *et al.*, 1992).

Pour s'affranchir des dispositifs de translation micrométrique, des méthodes ont été ensuite proposées pour permettre le calibrage à partir d'une mire plane déplacée librement dans le champ de vue de la caméra, sans que les positions de la mire dans l'espace aient besoin d'être connues (Ravn *et al.*, 1993; Harris *et al.*, 1993; Orteu *et al.*, 1997; Zhang, 1998). Ces méthodes ont permis de gagner en facilité de mise en œuvre, mais, comme elles considéraient que la géométrie de la mire était connue avec exactitude, la qualité du calibrage était tributaire principalement de la précision de la mire.

Lavest *et al.*(Lavest *et al.*, 1999) ont proposé une approche photogrammétrique, reprise par Garcia *et al.* (Garcia *et al.*, 2000; Garcia *et al.*, 2001; Garcia, 2001), qui ré-estime les points 3D de calibrage en même temps que les paramètres du modèle. La précision de calibrage n'est plus alors tributaire de la précision de la mire utilisée.

En utilisant une approche photogrammétrique, nous allons donc estimer M, $\mathbf{T}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{A}$ et $\mathcal{C}$ en minimisant la fonction objectif E suivante :

$$\mathrm{E}(\mathsf{M}, \mathbf{T}, \mathbf{P}, \mathbf{A}, \mathcal{C}) = \sum_i \sum_j \left\| \epsilon_i^j \right\|_2^2 \qquad [7]$$

où $\epsilon_i^j = \mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_i^j) - \mathsf{m}_i^j$ et $\tilde{\mathsf{m}}_i^j \cong \mathbf{APT}^j \tilde{\mathsf{M}}_i$.

ϵ_i^j représente l'erreur de reprojection, *i.e.* la différence entre les coordonnées des points N° i extraits (par analyse d'image) dans les images N° j, et les coordonnées calculées par le modèle de l'imageur pour chaque point correspondant de la mire.

REMARQUE. — Pour conduire à une solution unique, le problème de minimisation [7] doit être soumis à certaines contraintes. En effet, si la fonction spline $\mathcal{C}$ est solution, n'importe quelle autre fonction spline $\mathcal{C}' \equiv \mathbf{H}\mathcal{C}$ (où $\mathbf{H}$ est une transformation affine) est aussi solution. Pour éliminer les 6 degrés de liberté introduits par la famille de transformations affines compatibles, une base affine doit être fixée : les images, par la fonction $\mathcal{C}$, de 3 points-image distordus non-colinéaires peuvent être fixées à leur valeur non distordue présumée :

$$\mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_1) = \mathsf{m}_1, \qquad \mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_2) = \mathsf{m}_2 \qquad \text{et} \qquad \mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_3) = \mathsf{m}_3 \qquad [8]$$

où $\breve{\mathsf{m}}_1$, $\breve{\mathsf{m}}_2$ et $\breve{\mathsf{m}}_3$ sont les trois points contraignant l'espace des solutions compatibles de $\mathcal{C}$ à une solution unique. Nous rappelons que pour un point quelconque $\breve{\mathsf{m}}_i$ (hors $\breve{\mathsf{m}}_1$, $\breve{\mathsf{m}}_2$ et $\breve{\mathsf{m}}_3$) la fonction $\mathcal{C}$ est estimée par approximation (et non par interpolation) et elle ne passe donc pas exactement par la valeur non distordue présumée m_i. Lors de l'approximation, les contraintes sont appliquées en utilisant les multiplicateurs de Lagrange (*cf.* (Cornille, 2005) pour plus de détails).

3.1. *Algorithme de relaxation*

Le problème de minimisation [7] est résolu par une technique de relaxation. Les points-images corrigés de la distorsion ainsi que les paramètres du modèle sténopé sont estimés en utilisant l'algorithme itératif suivant :

0) Initialisation de la fonction de correction de distorsion $\mathcal{C}$ en considérant la distorsion nulle au départ de l'algorithme :

$$\mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_i^j) = \breve{\mathsf{m}}_i^j$$

1) Correction de la distorsion des points-images :

$$\mathsf{n}_i^j = \mathcal{C}(\breve{\mathsf{m}}_i^j)$$

2) Calibrage du modèle sténopé par ajustement de faisceaux (« bundle adjustment » en anglais) (*cf.* (Triggs *et al.*, 2000) pour plus de détails) :

$$\min_{\mathsf{M},\mathbf{T},\mathbf{P},\mathbf{A}} \sum_i \sum_j \|\epsilon_i^j\|_2^2 \qquad \text{avec} \qquad \epsilon_i^j = \mathsf{n}_i^j - \mathsf{m}_i^j$$

3) Estimation, sous la contrainte [8], de la fonction spline $\mathcal{C}$ de correction de distorsion permettant d'approximer les données $\{\breve{\mathsf{m}}_i^j, \mathsf{m}_i^j\}$

4) Répéter à partir de l'étape 1) jusqu'à convergence (le critère d'arrêt choisi est relatif : l'algorithme est arrêté lorsque l'amélioration de la valeur du résidu est inférieure à 0,1%).

À noter qu'avant la première itération, les paramètres du modèle sténopé sont estimés par une procédure de calibrage linéaire (Ravn *et al.*, 1993; Zhang, 1998) qui permet de fournir des estimées initiales à l'algorithme d'ajustement de faisceaux mis en œuvre à l'étape 2).

La fonction de correction de distorsion est estimée petit à petit à chaque itération à partir des erreurs de reprojection (*cf.* étape 3). Malheureusement, l'algorithme de base décrit précédemment conduit à une vitesse de convergence assez lente. Pour minimiser le nombre d'itérations (*cf.* figure 6), la méthode S.O.R. (Successive Over Relaxation) est utilisée (Kulsrud, 1961; Ostrowski, 1953). Cela consiste à estimer la fonction spline à partir de $\{\breve{\mathsf{m}}_i^j, \mathsf{n}_i^j + \omega\epsilon_i^j\}$ au lieu de $\{\breve{\mathsf{m}}_i^j, \mathsf{m}_i^j\}$ où ω est le paramètre de relaxation compris entre 1 et 2. La valeur optimale de ce paramètre peut être déterminée *a priori* (Lascaux *et al.*, 1987). Pour plus de détails, se reporter au chapitre 2 de (Cornille, 2005).

3.2. *Mise en œuvre pratique*

Comme cela a déjà été évoqué, le modèle d'imageur est généralement estimé à partir de l'analyse d'une séquence d'images d'une mire (dite de calibrage) constituée de motifs géométriques (damiers, croix, cercles...). La procédure expérimentale que nous proposons consiste à acquérir plusieurs images d'une mire de mouchetis quasi plane déplacée librement (rotations et translations) devant le champ de vue de l'imageur à calibrer. La mise en correspondance des différentes vues est obtenue par corrélation d'images.

REMARQUE. — Le fait que la mire soit quasi plane permet de fournir facilement à la procédure d'ajustement de faisceaux une estimée initiale des coordonnées (X, Y, Z) des points M de calibrage. La méthode pourrait fonctionner avec n'importe quel objet de calibrage dont on connaîtrait un modèle 3D approximatif. Dans (Cornille *et*

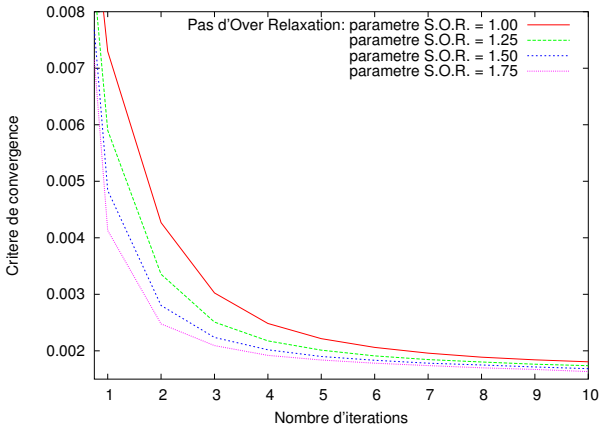

Figure 6. *Influence du paramètre de relaxation sur la vitesse de convergence de l'algorithme : on remarque que la méthode S.O.R. est surtout efficace lors des premières itérations*

al., 2003; Cornille, 2005), nous décrivons l'application de notre méthode au calibrage de l'imageur d'un microscope électronique à balayage (MEB). Plutôt que d'utiliser une mire spécifique, le calibrage a été réalisé avec succès à partir de plusieurs images d'une pièce de monnaie (surface quasi plane) placée sur le porte échantillon orientable du MEB (*cf.* section 4.3).

L'utilisation d'une mire de mouchetis couplée à l'appariement d'images par corrélation présente plusieurs avantages :

– facilité de réalisation de la mire. Par exemple, par pulvérisation de peinture sur n'importe quel support quasi plan ou par impression d'une image de mouchetis synthétique qui permet de bien maîtriser la qualité/corrélabilité du mouchetis (*cf.* chapitre 2 dans (Garcia, 2001)).

– meilleure précision de calibrage car la précision de mise en correspondance des points-images par corrélation (cas d'une mire de mouchetis) est meilleure que 0,01 pixel[5] alors que la précision d'extraction des centres des ellipses (cas d'une mire de cercles) est de l'ordre de 0,02 pixel.

– le nombre de points-images utilisés peut être très élevé (à la limite l'ensemble des pixels de l'image) alors que dans le cas d'une mire constituée de motifs géomé-

5. Pour atteindre cette précision de mise en correspondance, nous utilisons un algorithme de corrélation fine qui adapte localement la forme des fenêtres de corrélation (Garcia, 2001). La mire étant vue sous différentes orientations (*cf.* figure 9), les motifs à corréler sont déformés par projection perspective et il est nécessaire de déformer également la fenêtre de corrélation pour pouvoir apparier les images, qui plus est avec une bonne précision.

triques (damiers, croix, cercles...) ce nombre est généralement réduit (une centaine de points maximum).

L'évolution historique des procédures de calibrage présentée en introduction de cette section peut être complétée de la façon suivante : mires volumiques, mires planes précises déplacées avec précision, mires planes précises déplacées librement, mires planes imprécises déplacées librement et enfin mires planes de mouchetis déplacées librement.

La procédure de calibrage proposée peut se représenter schématiquement comme indiqué sur la figure 7.

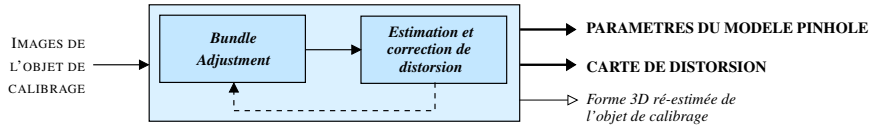

Figure 7. *Représentation schématique de la procédure de calibrage*

4. Applications

Dans cette section, nous présentons les résultats de calibrage obtenus avec la méthode présentée section 3, dans différentes configurations. La méthode a été utilisée avec succès pour calibrer non seulement une caméra CCD, mais aussi un stéréo-microscope et un microscope électronique à balayage, qui sont des systèmes d'imagerie bien connus pour présenter des distorsions géométriques complexes.

4.1. *Calibrage d'une caméra CCD*

Nous avons calibré une caméra de type QImaging Retiga 1300 équipée d'un objectif de 25 mm en utilisant deux méthodes distinctes :

1) à partir d'une série de 20 images d'une mire de calibrage standard constituée de 9×9 cercles (vus comme des ellipses dans les images) (*cf.* figure 8).

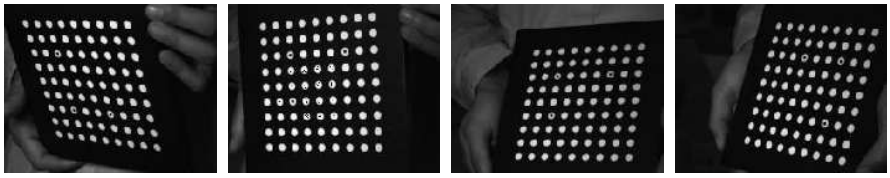

Figure 8. *Mire de calibrage classique (cercles)*

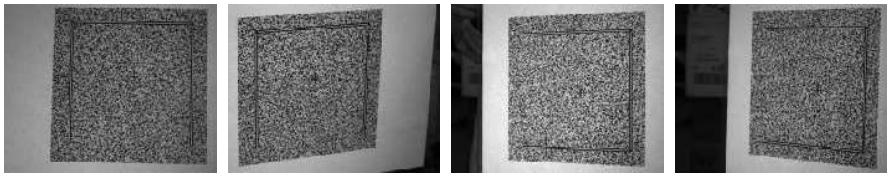

Figure 9. *Mire de mouchetis (motif aléatoire)*

2) à partir d'une série de 15 images d'une mire de mouchetis (*cf.* figure 9).

En utilisant la première série d'images (mire de cercles), nous avons calibré la caméra en utilisant un modèle paramétrique radial d'ordre 3. Nous avons obtenu un écart type de 0,04 pixel avec une erreur systématique[6] de 0,03 pixel. Avec un modèle sténopé classique (qui néglige la distorsion), nous avons obtenu un écart type de 0,1 pixel avec une erreur systématique de 0,1 pixel. En utilisant la procédure de calibrage décrite section 3 (modèle sténopé + spline bi-cubique avec algorithme de relaxation), nous avons obtenu un écart type de 0,03 pixel avec une erreur systématique de 0,03 pixel. À noter que la mire de cercles se prête mal à l'estimation de la distorsion par fonction spline car elle fournit seulement 81 points de calibrage, ce qui est insuffisant pour pouvoir estimer correctement la spline (seulement 9 points par patch en moyenne si on découpe la zone de l'image analysée en 3×3 patches).

Nous avons ensuite calibré la caméra en utilisant la deuxième série d'images (mire de mouchetis) et la procédure de calibrage décrite section 3. Nous avons utilisé 6500 points par image et des splines bi-cubiques avec 8×8 patches pour modéliser la distorsion. Nous avons obtenu un écart type de 0,01 pixel avec une erreur systématique de 0,02 pixel. Sans prendre en compte la distorsion, l'écart type est de 0,04 pixel avec une erreur systématique de 0,08 pixel, et avec un modèle paramétrique radial d'ordre 3 l'écart type est de 0,02 pixel. Même en présence d'une distorsion faible (*cf.* figure 10), la prise en compte de la distorsion dans le modèle améliore la précision de calibrage d'un facteur 2 (cas du modèle radial d'ordre 3) ou d'un facteur 4 (cas du modèle non-paramétrique). L'ensemble des résultats sont synthétisés sur le tableau 1.

Il est à noter que quel que soit le modèle de distorsion utilisé, le calibrage à partir d'une mire de mouchetis conduit à de meilleurs résultats qu'avec une mire de cercles (*cf.* tableau 1). Cela est dû à la fois au nombre de points pris en compte (6500 points dans le cas de la mire de mouchetis contre 81 pour la mire de cercles) et à la précision d'extraction des points (comme cela a déjà été mentionné, la précision de mise en correspondance des points par corrélation dans le cas de la mire de mouchetis est meilleure que 0,01 pixel alors que la précision d'extraction des centres des ellipses est de l'ordre de 0,02 pixel).

6. L'erreur systématique correspond à un biais de mesure et est égale à l'espérance des erreurs de reprojection. Nous approximons ce paramètre statistique par la moyenne arithmétique de ces erreurs.

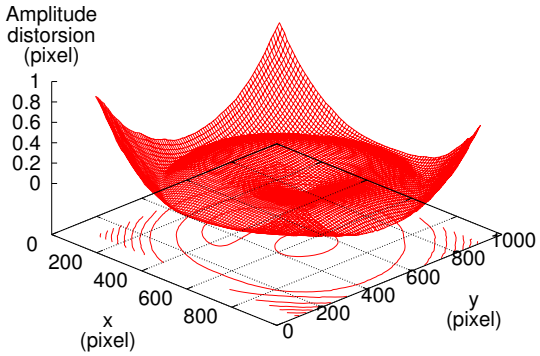

Figure 10. *Champ de distorsion obtenu en calibrant la caméra : l'amplitude de la distorsion est de l'ordre de 1 pixel aux coins de l'image*

Modèle	Mire classique	Mire de mouchetis
Sténopé	0,1	0,04
Sténopé + Radial ordre 3	0,04	0,02
Sténopé + Spline	0,03	0,01

Tableau 1. *Calibrage de la caméra : résumé des résultats obtenus (écart type en pixel)*

4.2. *Calibrage d'un stéréo-microscope*

Nous avons calibré un stéréo-microscope Nikon SMZ-U SOM (*cf.* figure 11) à partir de 20 images de mouchetis (*cf.* figure 12). Nous avons utilisé 3000 points par image et des splines bi-cubiques avec 8×8 patches pour modéliser la distorsion. La figure 13 montre le champ de correction de distorsion obtenu.

Nous avons obtenu un écart type de 0,005 pixel avec une erreur systématique de 0,01 pixel. En comparaison, l'écart type des erreurs sans prendre en compte la distorsion est de 0,08 pixel et il est de 0,04 pixel pour un modèle paramétrique avec distorsion radiale à l'ordre 3.

Pour plus de détails sur le calibrage du stéréo-microscope se reporter à (Schreier *et al.*, 2004).

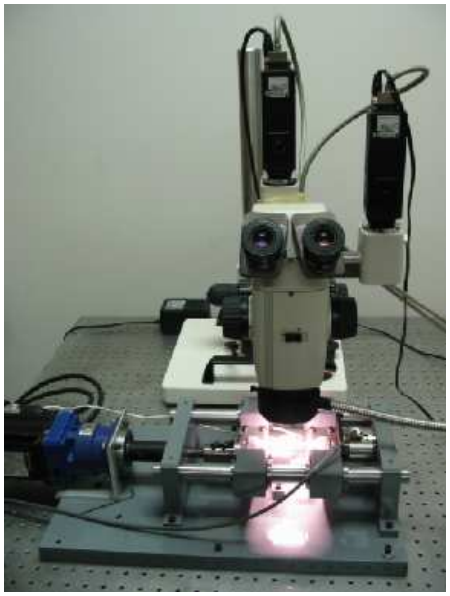

Figure 11. *Le stéréo-microscope*

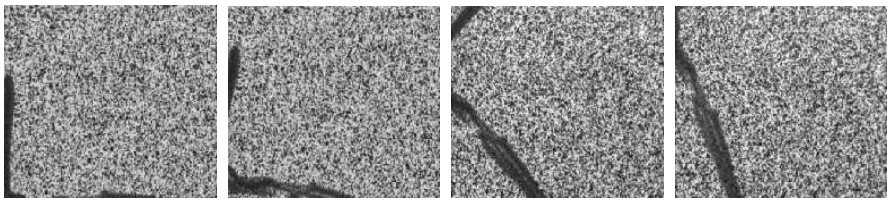

Figure 12. *4 images extraites de la série de 20 images d'une mire de mouchetis utilisées pour calibrer le stéréo-microscope*

4.3. *Calibrage de l'imageur d'un microscope électronique à balayage*

Nous avons calibré l'imageur d'un microscope électronique à balayage (MEB) de type FEI ESEM Quanta 200. Nous avons utilisé pour cela 24 images d'une mire de mouchetis (*cf.* figure 14) acquises avec un grandissement de 200×. La mire a été placée sur le porte échantillon orientable du MEB et déplacée devant le champ de l'imageur (rotations et translations). Nous avons utilisé 5000 points par image et des splines bi-cubiques avec des patches de 8×8 pour modéliser la distorsion.

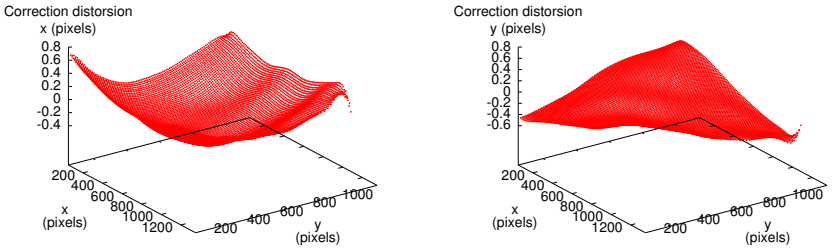

Figure 13. *Le champ de correction de distorsion obtenu en calibrant le stéréo-microscope*

Modèle	écart type (pixel)
Sténopé	0,08
Sténopé + Radial ordre 3	0,04
Sténopé + Spline	0,005

Tableau 2. *Calibrage du stéréo-microscope : résumé des résultats obtenus*

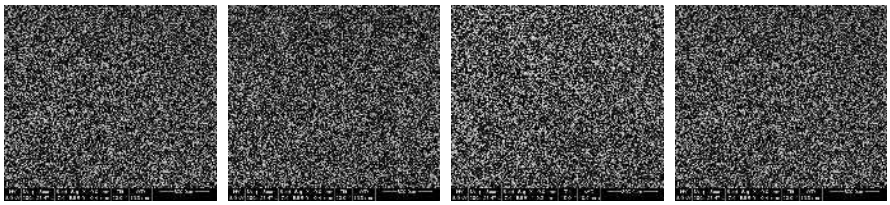

Figure 14. *4 images extraites de la série de 24 images d'une mire de mouchetis utilisées pour calibrer le MEB*

La figure 15 montre la distribution de l'amplitude des erreurs de reprojection suivant l'axe y. La figure de gauche montre qu'en appliquant notre méthode de calibrage nous obtenons une distribution des erreurs proche d'une distribution normale, sans erreur systématique, ce qui n'est pas le cas lorsqu'on calibre avec un modèle sténopé (qui néglige la distorsion) ou avec un modèle radial d'ordre 3 (*cf.* figure 15 b).

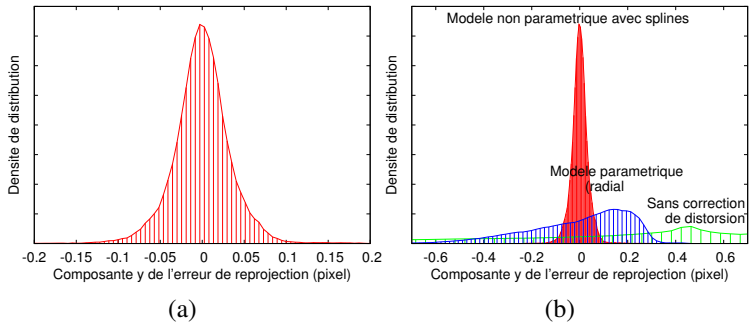

Figure 15. *Lorsque nous appliquons notre méthode de calibrage nous obtenons une distribution des erreurs proche d'une distribution normale (a), contrairement à ce qui se passe lorsqu'on calibre avec un modèle radial d'ordre 3 ou sans tenir compte de la distorsion (b)*

Le champ de correction de distorsion est illustré sur la figure 16. Dans les coins des images, où la distorsion est maximale, l'amplitude de la distorsion atteint 4 pixels.

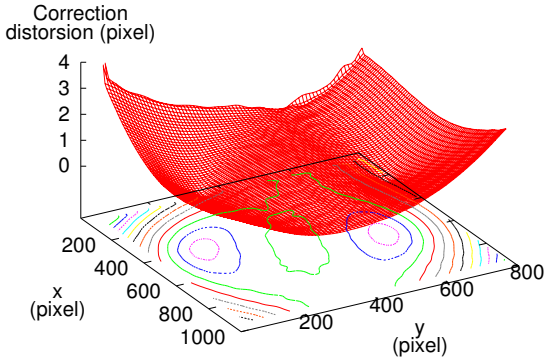

Figure 16. *Champ de correction de distorsion obtenu en calibrant le MEB : l'amplitude de la distorsion est de l'ordre de 4 pixels aux coins de l'image*

En utilisant la méthode de calibrage décrite dans la section 3, nous avons obtenu un écart type sur l'amplitude de l'erreur de reprojection de 0,02 pixel et une erreur systématique de 0,03 pixel. Avec les mêmes données et un modèle paramétrique radial d'ordre 3 nous avons obtenu un écart type de 0,14 pixel et une erreur systématique de 0,24 pixel. Avec un modèle sténopé (qui néglige la distorsion) nous avons obtenu un écart type de 0,43 pixel et une erreur systématique de 0,79 pixel.

Modèle	écart type (pixel)
Sténopé	0,43
Sténopé + Radial ordre 3	0,14
Sténopé + Spline	0,02

Tableau 3. *Calibrage du MEB : résumé des résultats obtenus*

Comme nous l'avons déjà évoqué, le calibrage du MEB a également été réalisé avec succès à partir de plusieurs images d'une pièce de monnaie (surface quasi plane) placée sur le porte échantillon orientable du MEB. La méthode de calibrage utilisée étant de type photogrammétrique, elle nous a fourni au final la forme 3D de la pièce. La figure 17 montre de façon qualitative la forme 3D reconstruite, ce qui montre que l'estimation de la distorsion et des paramètres de calibrage ne se fait pas au détriment d'autres paramètres. Pour que cette forme 3D constitue une réelle validation, il faudrait disposer de la forme exacte de la pièce (vérité terrain), ce que nous n'avions pas dans cette expérience. Par contre, le calibrage du MEB étant pour nous une étape préalable à son utilisation comme instrument de mesure de formes ou de déformations 3D à l'échelle micro/nano (Cornille *et al.*, 2004; Cornille, 2005), nous avons montré dans (Cornille, 2005) la qualité des formes 3D obtenues et l'influence de la qualité du calibrage et de la prise en compte des distorsions (complexes en l'occurrence).

5. Conclusion

Nous avons développé une nouvelle méthode de calibrage qui permet à la fois d'estimer les paramètres de l'imageur et de corriger les images de leur distorsion. Les résultats expérimentaux obtenus lors du calibrage d'une caméra CCD, d'un stéréo-microscope et d'une microscope électronique à balayage, montrent clairement l'amélioration apportée par rapport aux méthodes classiques et ils confirment la nécessité de prendre en compte les distorsions pour obtenir des mesures dimensionnelles précises. De plus, nous avons montré que, pour des systèmes optiques complexes, une approche paramétrique classique est insuffisante et qu'une approche non-paramétrique fournit de meilleurs résultats (ce qui avait déjà été montré par d'autres auteurs (Brand *et al.*, 1994; Peuchot, 1994)).

La méthode proposée, qui utilise une mire de mouchetis déplacée librement devant le champ de vue de l'imageur à calibrer, est plus simple à mettre en œuvre que les méthodes classiques et conduit à un calibrage plus précis.

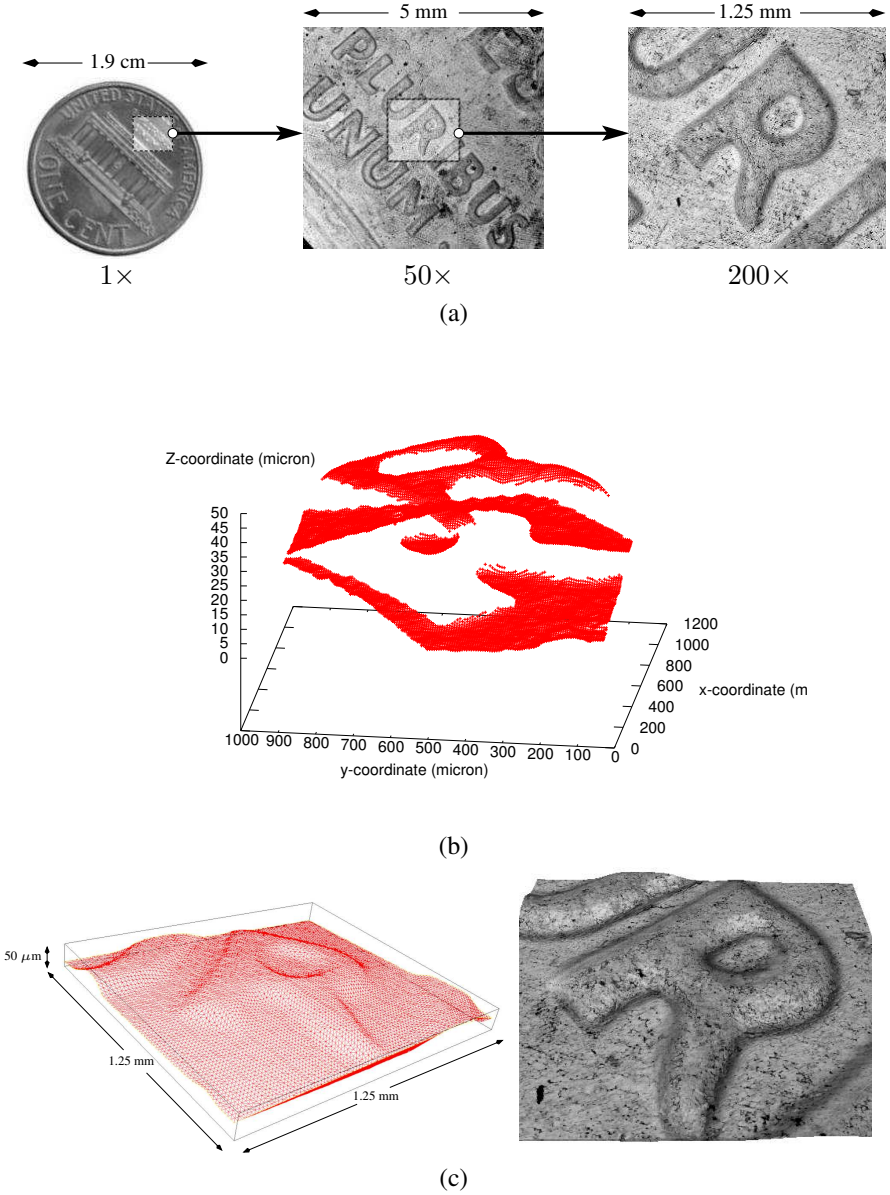

Figure 17. *Pièce de monnaie (penny américain) observée au MEB : (a) zone mesurée (la lettre "R" présente dans la phrase "E PLURIBUS UNUM", grandissement 200×) – (b) forme de la lettre "R" ré-estimée par la procédure de calibrage photogrammétrique (seules les zones quasi planes de la pièce ont été utilisées pour le calibrage) – (c) lettre "R" reconstruite en 3D par vidéogrammétrie à partir de plusieurs images de la pièce acquises sous différentes orientations après calibrage de l'imageur du MEB (à gauche, reconstruction 3D maillée et, à droite, reconstruction 3D avec texture plaquée)*

Remerciements

Les auteurs remercient H.W. Schreier de Correlated Solutions, Inc. pour ses remarques et les discussions fructueuses qu'ils ont eues avec lui à l'occasion des travaux présentés dans cet article.

6. Bibliographie

Beyer H. A., « Accurate Calibration of CCD cameras », *Proc. International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'92)*, Urbana Champaign (USA), p. 96-101, June, 1992.

Brand P., Mohr R., Bobet P., « Distorsions optiques : correction dans un modèle projectif », *Actes du 9ème Congrès AFCET (RFIA'94)*, Paris (France), p. 87-98, January, 1994.

Brown D. C., « Close-range camera calibration », *Photometric Engineering*, vol. 37, n° 8, p. 855-866, 1971.

Cornille N., Accurate 3D Shape and Displacement Measurement using a Scanning Electron Microscope, Phd – thèse de doctorat en co-tutelle, University of South Carolina (USA) et Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (France), June, 2005.

Cornille N., Garcia D., Sutton M. A., Mc Neill S. R., Orteu J.-J., « Calibrage d'un MEB en vue de la mesure précise de formes et de déformations 3D », *Photomécanique 2004*, Albi (France), p. 145-152, 4–6 Mai, 2004.

Cornille N., Garcia D., Sutton M. A., McNeill S. R., Orteu J.-J., « Automated 3-D Reconstruction using a Scanning Electron Microscope », *SEM Annual Conference and Exposition on Experimental and Applied Mechanics*, Charlotte (USA), June, 2003.

Faugeras O., *Three-Dimensional Computer Vision: A Geometric Viewpoint*, The MIT Press, 1993. ISBN 0-262-06158-9.

Faugeras O. D., Toscani G., « Camera Calibration for 3-D Computer Vision », *Proceedings International Workshop on Machine Vision and Machine Intelligence*, Tokyo, (Japan), February, 1987.

Garcia D., Mesure de formes et de champs de déplacements tridimensionnels par stéréo-corrélation d'images, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (France), December, 2001.

Garcia D., Orteu J.-J., Devy M., « Accurate Calibration of a Stereovision Sensor: Comparison of Different Approaches », *5th Workshop on Vision, Modeling, and Visualization (VMV'2000)*, Saarbrücken (Germany), p. 25-32, November, 2000.

Garcia D., Orteu J.-J., Devy M., « Calibrage précis d'une caméra CCD ou d'un capteur de vision stéréoscopique », *Photomécanique 2001*, Futuroscope, Poitiers (France), p. 24-26, April, 2001.

Harris C. G., Teeder A., « Geometric camera calibration for vision-based navigation », *IFAC Intelligent Autonomous Vehicles*, 1993.

Heikkila J., Silven O., « A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction », *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '97)*, Puerto Rico (USA), p. 1106-1112, June, 1997.

Horaud R., Monga O., *Vision par ordinateur : outils fondamentaux*, Hermès, 1995. Deuxième édition.

Kulsrud H. E., « A practical technique for the determination of the optimum relaxation factor of the successive over-relaxation method », *Communications of the ACM*, vol. 4, p. 184-187, 1961.

Lascaux P., Théodor R., *Analyse numérique matricielle appliquée à l'art de l'ingénieur*, Masson, 1987. ISBN 2-90360-760-5.

Lavest J. M., Viala M., Dhome M., « Quelle précision pour une mire d'étalonnage ? », *Traitement du Signal*, 1999.

Nielsen H. B., Cubic Splines, Lecture notes, Department of Mathematical Modelling, Technical University of Denmark, 1998.

Orteu J.-J., Garric V., Devy M., « Camera calibration for 3D reconstruction: application to the measure of 3D deformations on sheet metal parts », *European Symposium on Lasers, Optics and Vision in Manufacturing*, Munich (Allemagne), June, 1997.

Ostrowski A., « On Over and Under Relaxation in the Theory of the Cyclic Single Step Iteration », *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, vol. 7, n° 43, p. 152-159, 1953.

Peuchot B., « Utilisation de détecteurs subpixels dans la modélisation d'une caméra », *Actes du 9ème Congrès AFCET (RFIA'94)*, Paris (France), p. 691-695, January, 1994.

Ravn O., Andersen N. A., Sorensen A. T., « Auto-calibration in Automation Systems using Vision », *3rd International Symposium on Experimental Robotics (ISER'93)*, Kyoto (Japan), p. 206-218, 1993.

Schreier H. W., Garcia D., Sutton M. A., « Advances in Light Microscope Stereo Vision », *Experimental Mechanics*, vol. 44, n° 3, p. 278-288, 2004.

Triggs B., McLauchlan P., Hartley R., Fitzgibbon A., « Bundle Adjustment – A Modern Synthesis », *in* W. Triggs, A. Zisserman, R. Szeliski (eds), *Vision Algorithms: Theory and Practice*, LNCS, Springer Verlag, p. 298-375, 2000.

Tsai R. Y., « An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision », *Proceedings IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, p. 364-374, 1986.

Tsai R. Y., « A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-Shelf TV Cameras and Lenses », *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. RA-3(4), p. 323-344, August, 1987.

Weng J., Cohen P., Herniou M., « Camera Calibration with Distorsion Models and Accuracy Evaluation », *Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, vol. 14, n° 10, p. 965-980, October, 1992.

Zeller C., Calibration projective, affine et euclidienne en vision par ordinateur et application à la perception tridimensioinnelle, Thèse de doctorat, École Polytechnique (France), February, 1996.

Zhang Z., A Flexible New Technique for Camera Calibration, Technical Report n° MSR-TR-98-71, Microsoft Research, December, 1998. Updated on March, 1999.